

# 14. Áreas con potencial productivo ante el cambio climático. El caso del aguacate en Puebla, México



EDUARDO PÉREZ SOSA\*  
GUADALUPE REBECA GRANADOS RAMÍREZ\*\*  
MIGUEL ÁNGEL SAZ SÁNCHEZ\*\*\*  
MARÍA LUZ HERNÁNDEZ NAVARRO\*\*\*\*

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.296.14>

## Resumen

La apertura de áreas nuevas para la producción de aguacate en México no cuentan con una zonificación que identifique aquellas de mayor aptitud, sobre todo bajo escenarios de cambio climático. La zonificación de cultivos mediante la planificación agrícola puede ser comparada, complementada o fortalecida con la incorporación de diversas variables o con métodos de ponderación diferentes. Con el fin de fortalecer la toma de decisiones para la planificación agrícola en la producción frutícola del aguacate, así como para futuras investigaciones al respecto, se debe crear una base de datos georreferenciada para las plantaciones de aguacate en Puebla que permita el contraste de los modelos que se generen. Este capítulo tiene como objetivo el evaluar el potencial productivo para el aguacate con base en sus requerimientos ambientales bajo un escenario actual y con cambio climático. Entiéndase el término potencial como las zonas que cuentan con condiciones favorables para el aguacate, pero que no están siendo aprovechadas actualmente, o bien las que podrían ser empleadas para la apertura de nue-

---

\* Doctorante en Geografía, Universidad de Zaragoza. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6488-8537>

\*\* Doctora en Geografía. Profesora, Universidad Nacional Autónoma de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3244-2431>

\*\*\* Doctor en Geografía. Profesor, Universidad de Zaragoza. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8979-0253>

\*\*\*\* Doctora en Geografía. Profesora, Universidad de Zaragoza. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4037-6902>

vas plantaciones, sobre todo aquellas que requieren insumos externos y en las que se tendría que prestar más atención para prevenir efectos negativos derivados del cambio climático.

**Palabras clave:** *aguacate, zonificación, cambio climático, Puebla.*

## Introducción

El aguacate es un producto que presenta una demanda progresiva; se proyecta un aumento en su consumo a nivel mundial durante los próximos años, lo cual requerirá de un fortalecimiento a las plantaciones existentes y el establecimiento de nuevos sitios de producción. Sin embargo, la apertura de áreas nuevas sin una zonificación que identifique aquellas de mayor aptitud para el aguacate implicaría la sustitución de cultivos o el cambio de uso del suelo relacionados con una limitada planificación territorial. A nivel mundial, México es el principal productor y exportador de aguacate (*Persea americana* Mill.), estatus que ha mantenido desde hace varias décadas. Otros países productores que contribuyen a la producción total mundial son Perú, Chile, España, Sudáfrica y Kenia (Arias et al., 2018; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2020). De acuerdo con los datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), en 2021 se reportaron en México más de 248 000 ha sembradas, de las cuales se obtuvieron aproximadamente 50 000 millones de pesos (SIAP, 2021). Por otro lado, México también es el país donde la ingesta es significativa, aproximadamente el consumo per cápita al año asciende a 8 kg; seguido de Estados Unidos con 3.6 kg y se espera un incremento importante en los países europeos y asiáticos (FAO, 2020).

En México, los principales estados productores son Michoacán, Jalisco, México, Nayarit y Morelos. Puebla se posiciona en el séptimo sitio con más de 16 mil toneladas producidas; su explotación representa un importante ingreso económico para los productores de municipios como Quimixtlán, Tochimilco y Atlixco (SIAP, 2021). Lo anterior motiva a los agricultores a sustituir sus cultivos o incrementar las superficies ocupadas con dicho frutal. En los estados productores del país se pretende aumentar las superficies

cultivadas con aguacate; la estimación en la producción y consumo que proyectó la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, Pesca (Sagarpa) para 2030 sería de 67.2% (Sagarpa, 2017). Por tanto, es prioritario identificar a escala regional las áreas óptimas para el establecimiento de nuevas superficies destinadas al aguacate en los estados productores a fin de ampliar su frontera agrícola de forma mesurada.

Debido a que el aguacate representa uno de los principales productos agrícolas con un aporte económico relevante, para los agricultores resulta atractiva la incorporación de plantaciones en sus parcelas o a través de la sustitución de sus cultivos actuales menos rentables. Si bien es cierto que la introducción del aguacate tiene efectos positivos como el aumento de ingresos económicos, tanto para los productores como para las regiones productoras, también ha implicado problemas ambientales como el cambio de uso del suelo de forestal a agrícola y el agravamiento de efectos negativos tales como el fomento al monocultivo, erosión de los recursos genéticos, dependencia de insumos químicos para la producción y la consecuente contaminación y degradación de los recursos.

Aunado a lo anterior, cada vez es más aceptado que la agricultura será una de las principales actividades económicas que resienta los impactos del cambio climático. Esto implica que los problemas actuales que atañen a la agricultura se acrecienten o se atenúen. Desde hace décadas ya se han abordado algunos de los impactos en esta actividad para diferentes escenarios, ya sea mediante su expresión en el comportamiento fenológico de los cultivos o de manera indirecta en el desplazamiento de la frontera agrícola.

Debido a lo señalado, este trabajo tiene como objetivo el evaluar el potencial productivo para el aguacate con base en sus requerimientos ambientales bajo un escenario actual y con cambio climático. De esta forma, se pretende proporcionar información tanto a las personas dedicadas a la investigación, como a los agricultores y tomadores de decisiones acerca de las áreas óptimas para las plantaciones de aguacate, aquellas que son potenciales (entiéndase el término potencial como esas zonas que cuentan con condiciones favorables para el aguacate, pero que no están siendo aprovechadas actualmente, o bien las que podrían ser empleadas para la apertura de nuevas plantaciones), cuáles requieren insumos externos y en las que se tendría que prestar más atención para prevenir efectos negativos producto del cambio climático.

Además, se incentiva a la reflexión del proceso de producción actual; repensar el fortalecimiento e impulso de las plantaciones de aguacate en esta entidad, pero no bajo un contexto de producción tradicional dominado por el monocultivo que promueve la priorización comercial del producto y el aumento de la frontera agrícola sin considerar el deterioro de recursos, tanto ambientales como genéticos, hacia enfoques alternativos como el agroclimático donde se realiza la valoración de la aptitud agrícola local o regional, según las disponibilidades climáticas, esto con el fin de asesorar sobre el tipo de cultivos posibles y técnicas culturales adecuadas y así encaminarse a la formulación de una estrategia agrícola idónea y sostenible.

## Panorama agrícola del aguacate en Puebla

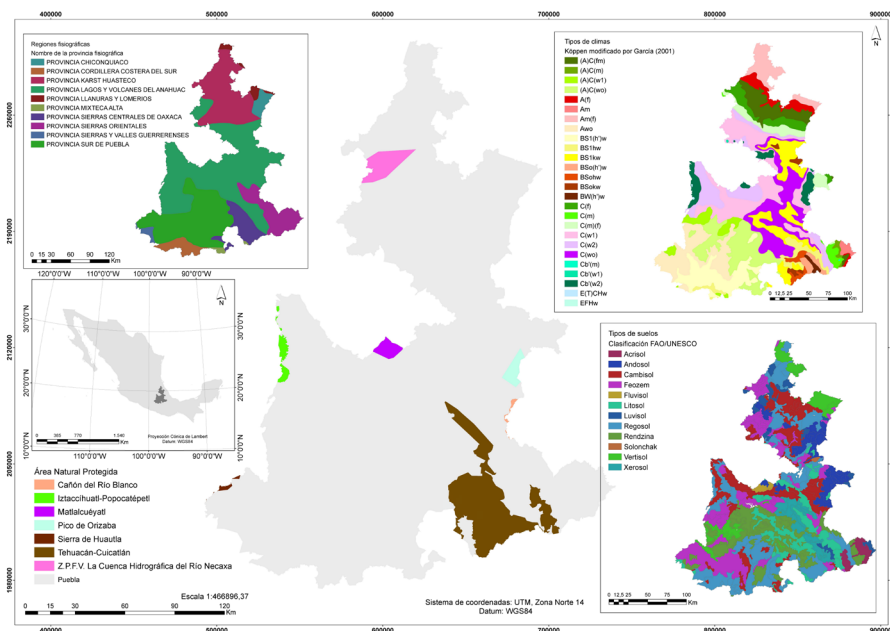
El árbol de aguacate (*Persea americana*) pertenece a la familia numerosa de las Lauráceas cuyo origen de domesticación se remite a Mesoamérica. Las principales variedades botánicas cultivadas fueron domesticadas en esta región, lo que dio como resultado una diferenciación por ecotipos; de las regiones montañosas de México surgió la variedad mexicana (*var. drymifolia*); de las tierras altas de Guatemala la variedad guatemalteca (*var. guatemalensis*); de las tierras bajas de la costa de Guatemala la variedad antillana (*var. americana* Mill.), (Jardón-Barbolla et al., 2011). Cada una posee particularidades que les permite la adaptación a variadas zonas y atributos distintivos como el tamaño, color y sabor. Como resultado de la hibridación entre estas han surgido las variedades comerciales Hass, Fuerte, Bacon, Edranol, Choquet, entre otras.

Los tipos de climas a los que la planta ha sido introducida y adaptada abarca desde cálidos, hasta templados. Los tipos de suelos que favorecen su cultivo son los andosoles y litosoles, aunque es sabido que según la variedad se puede plantar en suelos con características menos asequibles. Los requerimientos ambientales de las tres principales variedades están relativamente bien identificados; los dos factores que influyen en el crecimiento y desarrollo del aguacate son la temperatura y disponibilidad de agua.

En Puebla, entidad localizada en la parte central de México existen las condiciones climático-edáficas con potencial productivo. Su territorio está

determinado principalmente por la Sierra Madre Oriental y el Sistema Volcánico Transversal; entre sus macizos montañosos se encuentran numerosos valles y amplias llanuras categorizadas en provincias fisiográficas con diversas características edáficas, así como una gama de climas que van de los cálidos a los fríos (figura 14.1).

Figura 14.1. Localización y características físico-geográficas de área de estudio

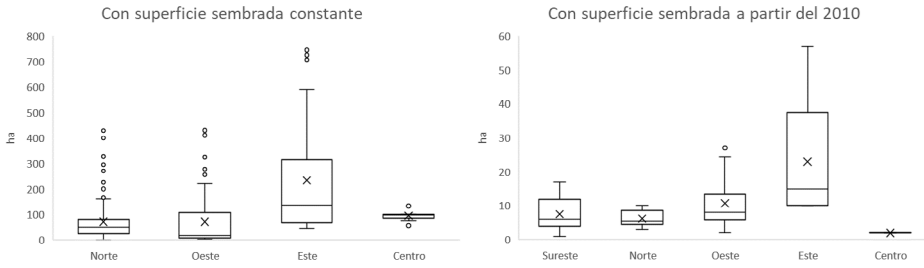


Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI (2017a).

El aguacate ocupa el noveno lugar por superficie sembrada en México, por debajo de cultivos como el café, naranja, alfalfa verde, caña de azúcar y manzana que superan las 100 000 ha sembradas. Sin embargo, por producción y rendimiento se encuentra alejado de los primeros sitios. A pesar de lo anterior, es el octavo producto con un valor de producción superior a los 2 000 millones de pesos, cuyo precio medio rural es aproximado a los 8 000 pesos mexicanos por hectárea, lo cual sitúa al aguacate como un frutal de venta de primera mano aceptable, pero alejado de las cifras que se obtienen por productos como la cereza, vainilla, piñón o frambuesa (SIAP, 2021). Los

municipios en la región este son los que reportan mayor superficie sembrada; en municipios al norte y oeste se registran valores atípicos que no superan las 500 ha (gráfica 14.1).

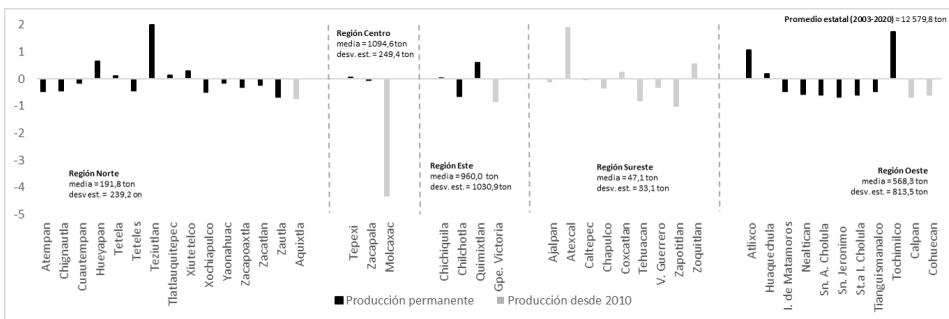
Gráfica 14.1. Superficie sembrada con aguacate en Puebla (2003-2020)



Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP (2021).

En promedio, los municipios más productivos se localizan al este de la entidad, seguido de los del centro, oeste, norte y sureste, sin embargo, en estas dos últimas regiones las desviaciones estándar son menores, y para el caso de la región sureste se trata de una superficie sembrada reciente, por lo tanto, también lo es su producción (gráfica 14.2).

Gráfica 14.2. Anomalías de la producción de aguacate en Puebla (2003-2020)



Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP (2021).

En Tochimilco (oeste), Quimixtlán (este), Atlixco (oeste), Tepexi (centro) y Zacapala (centro) se contribuye con más de 1 000 toneladas de



En este sentido, en Quimixtlán se ha registrado el precio más alto en 2018, superior a los 50 millones de pesos mexicanos. En la región central de la entidad, en dos de los tres municipios productores, los precios alcanzados se acercan a los 20 millones de pesos; mientras que el precio que se logra en Teziutlán al norte y Atlixco y Tochimilco en el oeste es de 10 a 15 millones de pesos. En el resto de los municipios localizados en el norte, sureste y al oeste, los precios se encuentran entre los 200 000 y menos de 5 millones de pesos.

Al igual que el valor de la producción, el precio medio rural también es ascendente, el año 2014 fue cuando se alcanzó una cifra récord en promedio, llegando a los 34 000 pesos por tonelada. Con excepción de la región oeste, el promedio del precio medio rural se encuentra por encima de los 10 000 pesos; los máximos se registraron en los municipios localizados en el centro y sureste, mientras que los mínimos sucedieron en el oeste y al norte (gráfica 14.3).

En resumen, en la región norte existen superficies sembradas desde el inicio del registro de los datos oficiales (año 2003) que se han mantenido relativamente constantes hasta el 2020; sin embargo, los valores medios están por debajo en comparación con las otras regiones; a partir del 2010, dos municipios de esta región comenzaron a sembrar aguacate en no más de 10 ha; aunque la mayoría de los municipios producen por debajo de la media regional, hay casos en los que la producción supera de manera positiva a la media; no es el caso de los rendimientos, de hecho, los valores más bajos suceden en esta región, a pesar de lo anterior el valor de la producción y el precio medio rural suelen ser similares a las de las otras regiones.

En la región centro, la superficie sembrada y la producción media son los más bajos en comparación con las demás regiones, sin embargo, los rendimientos son los más altos, el valor de la producción se encuentra entre los mejores y el mayor precio medio rural se obtuvo aquí. La región este es la que mayor superficie sembrada destina al aguacate y su producción también es relevante, aunque con la mayor variación en relación con las otras zonas; los rendimientos son ligeramente superiores a los de la región norte, pero con menor variabilidad; en esta área se han logrado valores de producción y precios medios muy altos.

La región sureste tiene superficie sembrada a partir del 2010, por lo que los valores en este ámbito son menores, así como la producción obtenida y su valor, sin embargo, el precio medio rural que se ha alcanzado es similar a la región centro y está por encima de la zona este. Por último, la región oeste es la segunda en superficie sembrada y producción; los rendimientos, aunque aceptables, son más variables en comparación con las otras regiones; los valores de producción pueden llegar a ser altos, sin embargo, el precio medio rural es el más bajo en contraste con las regiones restantes.

### **Metodología para la zonificación de cultivos mediante evaluación multicriterio y sistemas de información geográfica**

En este trabajo se presenta una metodología que involucra aspectos de toma de decisiones de carácter espacial para la prospección de áreas óptimas para el establecimiento de plantaciones de aguacate. Se utilizaron criterios climáticos y edáficos para la construcción del modelo de evaluación multicriterio que se ponderaron por medio de una comparación pareada con el método proceso analítico jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) y posteriormente se ajustaron a funciones de valor asociadas con los rangos considerados como óptimos en el área de estudio. Toda la información se integró a un sistema de información geográfica donde se llevaron a cabo los análisis para la zonificación. Los resultados indican que los climas templados y cálidos son los ideales para cubrir las necesidades de agua y calor que requieren los árboles de aguacate.

Para identificar las áreas óptimas se emplearon variables climáticas y edáficas; estas han sido utilizadas con fines de zonificación para el aguacate (García-Lozano et al., 2013; Garrido-Ramírez et al., 2013). La metodología utilizada comprendió aspectos de la evaluación multicriterio a través del ajuste de las variables a funciones y ponderaciones efectuadas por Procesos Analíticos Jerárquicos llevados a un sistema de información geográfica con base en la metodología propuesta por Malczewski (1999) y adaptada para diversos estudios (Sotelo-Ruiz et al., 2016; González-Hernández et al., 2017; Chivasa et al., 2019).

## Obtención y manejo de la información

Las temperaturas y precipitaciones mensuales en formato ráster a  $900 \times 900$  m de resolución espacial se obtuvieron desde el Repositorio del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (Uniatmos, 2014a; 2014b; 2014c; 2014d; 2014e; y 2014f). La información utilizada fue sometida a un estricto control de calidad y tomó en cuenta el efecto de la topografía para la interpolación de las variables con el fin de ajustarlas a las condiciones del territorio mexicano (Fernández-Eguiarte et al., 2015); mientras que las variables de profundidad y pH del suelo se adquirieron de la base de datos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2013). Para esto se emplearon métodos de interpolación mediante la distancia inversa ponderada y se utilizó la misma resolución espacial que las variables climáticas. Para representar los factores que restringen de algún modo el establecimiento de las plantaciones de aguacate se utilizó la información de uso del suelo y vegetación (INEGI, 2017b), áreas naturales protegidas (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales / Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [Semarnat / Conanp, 2017], tipos de suelos (INEGI, 2005) y erosión del suelo (INEGI, 2014).

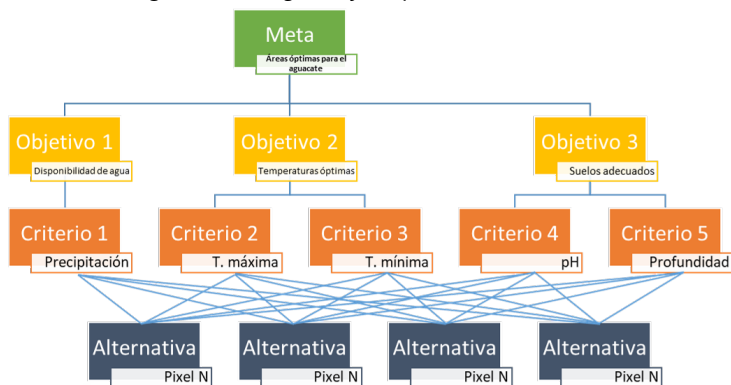
## Etapas de análisis

La primera etapa consistió en la construcción de un modelo jerárquico de decisión, compuesto por una meta, objetivos, criterios y alternativas (figura 14.2). En este caso, la meta fue encontrar las zonas óptimas para las plantaciones de aguacate en Puebla. Los objetivos corresponden a que en esas áreas se logre: (a) la disponibilidad de agua para satisfacer las necesidades hídricas de los árboles de aguacate sin riego; (b) temperaturas óptimas para el crecimiento y desarrollo de los árboles y frutos; (c) características de suelos adecuados para las plantaciones.

Además, con el fin de proporcionar una evaluación completa del grado en que se pueden alcanzar los objetivos son necesarios los atributos o criterios. Los criterios corresponden a los valores promedio de las variables climáticas y edáficas asociadas con la aptitud para el aguacate. Estos criterios

deben cumplir ciertas características: ser completos, operativos, no redundantes y mínimos (Pacheco y Contreras, 2008). Las alternativas de decisión son cada uno de los píxeles que conforman el área de estudio.

Figura 14.2. Diagrama jerárquico de decisión AHP



Fuente: Elaboración propia.

La importancia/peso de cada variable fue asignada mediante una comparación pareada por AHP en el software SuperDecisions® que utiliza una escala numérica que se corresponde con expresiones verbales. A partir de estas comparaciones, el *software* calcula el peso de cada variable mediante el álgebra de matrices. Para evaluar la congruencia de las comparaciones, el *software* ofrece un índice de consistencia, cuyo valor debe ser menor a 0.1. La toma de decisiones asociada con la relevancia de cada variable provino principalmente de la búsqueda bibliográfica y la consulta a seis expertos, tres investigadores, y el resto entre productores y agricultores. En consecuencia, se consideraron los siguientes criterios generales: la precipitación y temperatura mínima son los elementos climáticos más relevantes para el aguacate; el exceso o déficit hídrico repercute en el desarrollo y crecimiento vegetativo del árbol, así como la polinización, la formación de frutos y el desarrollo de enfermedades (Gardiazabal, 2004; Coria-Avalos, 2009; Gutiérrez-Contreras et al., 2010; Lucero-Pulido y Navarro-Ainza, 2013; Zapata-Guzmán et al., 2018). Mientras que las bajas temperaturas causan daños a los órganos más tiernos como flores, brotes y pequeños frutos, incluso pueden dañar permanentemente al árbol si se mantienen temperaturas por debajo de los 0°C, pero también

son necesarias para la inducción de la floración (Gutiérrez-Contreras et al., 2010; Alcantar-Rocillo y Muñoz-Flores, 2012; Romero-Sánchez, 2012; Ruiz-Corral et al., 2013; Zapata-Guzmán et al., 2018).

El aguacate es considerado como un árbol que se adapta a gran diversidad de suelos en función de la variedad, pero requiere de aquellos con buen drenaje y profundidad. Los suelos de textura media, bien drenados, con pH de 5.5 a 7.5 y profundidad mayor a 1.5 m, con contenido de nitrógeno, fósforo y potasio, así como de elementos menores como magnesio, hierro y zinc, son favorables para las plantaciones (Lucero-Pulido y Navarro-Ainza, 2013). En tanto que los andosoles y luvisoles son suelos adecuados para el aguacate (Coria-Avalos, 2009; Gutiérrez-Contreras et al., 2010). El último criterio fue la temperatura máxima, si se presentan temperaturas muy altas y constantes se pueden alterar las etapas de floración y fructificación (Coria-Avalos, 2009; Gutiérrez-Contreras et al., 2010; Ruiz-Corral et al., 2013; Sarmiento-Sarmiento, 2018; Zapata-Guzmán et al., 2018). Bajo esta lógica se realizó la comparación en pares y se obtuvieron los pesos de la tabla 14.1. El valor del índice de consistencia fue de 0.049, lo que indica la congruencia de las comparaciones.

Tabla 14.1. *Matriz de comparación de los criterios de clima y suelos mediante AHP*

<i>Crterios</i>	<i>Prec.</i>	<i>T.mín</i>	<i>T.máx</i>	<i>pH</i>	<i>Prof.</i>	<i>Peso</i>
Prec.	1	2	2.89	2.93	3.02	0.37
T.mín	0.5	1	3.96	2.93	2.98	0.29
T.máx	0.35	0.25	1	0.34	0.52	0.07
pH	0.34	0.34	2.93	1	2.04	0.16
Prof.	0.49	0.34	1.91	0.49	1	0.10

Fuente: Elaboración propia.

La segunda etapa residió en el ajuste de los criterios a las funciones. De acuerdo con Malczewski (1999), los objetivos implican la maximización o minimización de una función  $f(x)$ , donde  $x$  es un vector de atributos o variables de decisión asociadas a un objetivo. Los rangos de idoneidad edafoclimática para el aguacate se encuentran sintetizados en la tabla 14.2 y se establecieron con base en investigaciones previas (Gardiazabal, 2004; Gandolfo, 2008; Alcantar-Rocillo, 2009; Gutiérrez-Contreras et al., 2010; Alcantar-Rocillo y Muñoz-Flores, 2012; Romero-Sánchez, 2012; Ruiz-Corral et al., 2013;

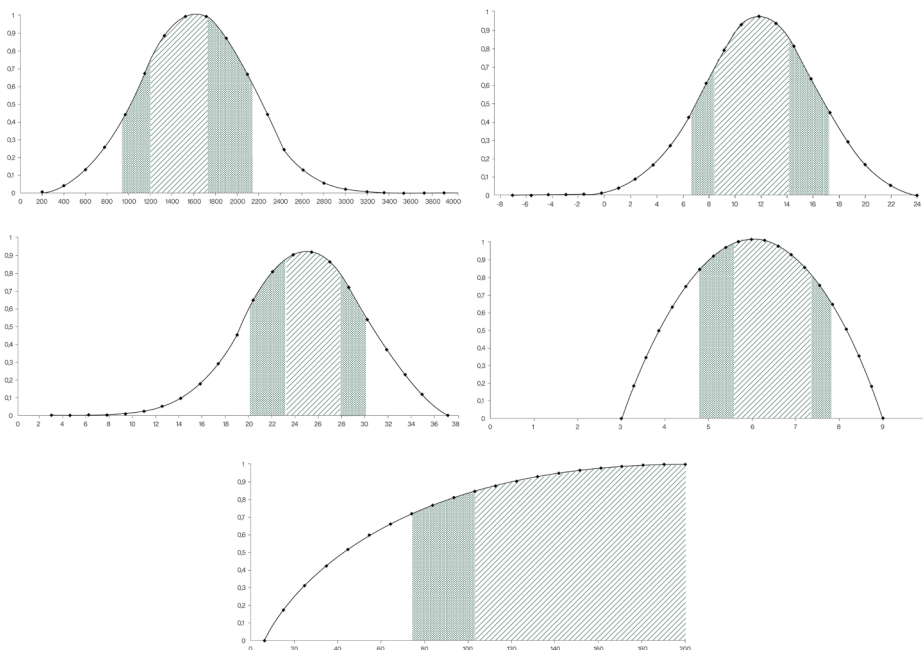
Sarmiento-Sarmiento, 2018; SIAP, 2018; Zapata-Guzmán et al., 2018). Estos rangos se emplearon para relacionar el ajuste que tendrá cada criterio en la función seleccionada asociados con los valores mínimos y máximos presentes en el área de estudio.

Tabla 14.2. Criterios para el ajuste de funciones en el área de estudio

Criterios	Requerimientos	Valores			Parámetros		
	Óptimos	Mínimos	Máximos	Xmax	$\alpha$	$\gamma$	S
Prec.	1200-1800	225	3909	1600	700	NA	NA
T. mín	8-14	-7	20	12	6	NA	NA
T.máx	23-28	3	35	25	7	NA	NA
pH	5.5-7.5	3	9	6	7	NA	NA
Prof.	> 100	6	200	200	NA	0.17	4

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 14.4. Ajustes de los valores a funciones (curvas)



Fuente: Elaboración propia. Nota: De izquierda a derecha: precipitación, temperatura mínima, temperatura máxima, pH y profundidad del suelo. El área con achurado en diagonal representa las condiciones óptimas, mientras que el área con achurado en puntos simboliza las condiciones medias.

Los valores de función fueron evaluados entre 0 y 1, donde 1 es el valor máximo de aptitud (véase la gráfica 14.4). Para la precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y pH la curva ajustada fue la de campana (ecuación 1) porque el comportamiento de las variables, con respecto de la aptitud, en parte es creciente y decreciente. Para la profundidad se empleó una función convexa creciente (ecuación 2), debido a que a mayor profundidad del suelo mejoran las condiciones para el aguacate.

$$v = e^{-\left(\frac{x-x_{max}}{\alpha}\right)^2} \quad (1)$$

Donde  $v$ : valor transformado del criterio;  $e$ : exponencial base  $e$ ;  $x$ : valor original del criterio (capa de entrada ráster);  $x_{max}$ : valor máximo original del criterio (capa de entrada ráster);  $\alpha$ : amplitud de la curva.

$$v = 1 - e^{-\gamma x} \quad (2)$$

Donde  $v$ : valor transformado del criterio;  $e$ : exponencial base  $e$ ;  $x$ : valor original del criterio (capa de entrada ráster);  $\gamma$ : parámetro de control (ecuación 3).

$$\gamma = \frac{-\log(\log(1.1+0.88(10-S)))}{\log^2(x_{max})} \quad (3)$$

$S$  = saturación de la curva (curvatura)

Tanto las ecuaciones y los valores del rango fueron integrados al sistema de información geográfica ArcMap10.5.1® con el fin de construir los mapas de los criterios estandarizados (ecuación 4). La fase posterior de esta etapa consistió en la combinación lineal ponderada mediante la ecuación 5, donde cada uno de los valores de los pixeles contiene una alternativa de decisión para la aptitud.

$$v' = \frac{v - v^{min}}{v^{max} - v^{min}} \quad (4)$$

Donde  $v'$ : valor estandarizado del criterio;  $v$ : valor transformado del criterio;  $v^{min}$ : valor transformado mínimo;  $v^{max}$ : valor transformado máximo.

$$a = \sum_1^i v_i' w_i \tag{5}$$

Donde  $a$ : valor que representa la aptitud para el aguacate;  $v_i'$ : valor estandarizado del criterio  $i$ ;  $w_i$ : peso del criterio  $i$ .

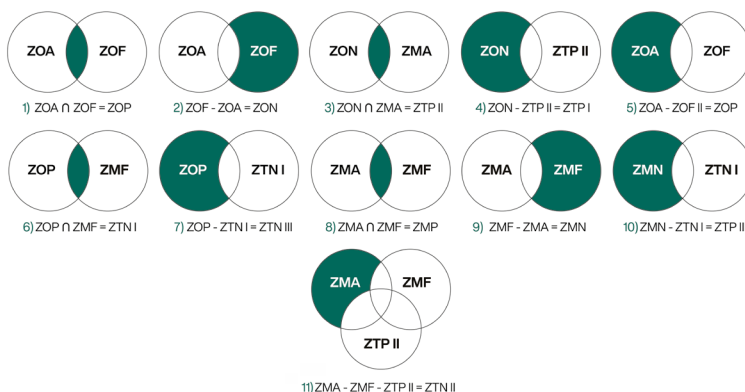
Como resultado se obtiene un mapa de aptitud con valores del 0 al 1. En este caso se seleccionaron aquellos pixeles relacionados con las condiciones óptimas (valores entre el 0.8 y 1). Posteriormente se emplearon como un polígono de máscara los criterios de restricciones para las plantaciones de aguacate (tabla 14.3). El resultado de lo anterior es el polígono de las áreas con condiciones óptimas para el aguacate en Puebla.

Tabla 14.3. Restricciones para las plantaciones de aguacate

Tipo	Descripción
Suelos desfavorables o poco favorables	Los suelos ácidos y salinos como acrisoles y solonchack, así como los que tienden a erosionarse o a la salinización como vertisoles o xerosoles. Aquellos con poca profundidad, someros o poco desarrollados o que están asociados con bajos rendimientos como fluvisoles, litosoles y rendzina (INEGI, 2004).
Uso del suelo prioritario	Conformado por todos los tipos de bosques presentes en el área de estudio, así como su correspondiente vegetación secundaria arbórea. Los polígonos de las áreas naturales protegidas (ver figura 14.1).
Uso del suelo no apto	Los cuerpos de agua y áreas urbanas.
Erosión del suelo	Grados altos y medios de erosión eólica e hídrica.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 14.3. Diagrama para la identificación de áreas potenciales para el aguacate bajo un escenario actual y por cambio climático



Fuente: Elaboración propia.

La última etapa consistió en la zonificación bajo escenarios de cambio climático, por lo que se repitieron las fases anteriores sustituyendo las coberturas climáticas del escenario base con las del modelo de cambio climático. Una vez obtenidas ambas zonificaciones se realizó una serie de operaciones booleanas para la identificación de las áreas potenciales, aquellas que permanecerían, las que aumentarían su categoría y las que la disminuyen (figura 14.3).

Del anterior diagrama se desprenden las siguientes consideraciones:

- De la intersección entre las zonas óptimas actuales (ZOA) y las zonas óptimas a futuro (ZOF) se obtuvo el polígono denominado como zonas óptimas persistentes (ZOP); se tratan de áreas óptimas actuales que permanecerían sin cambios.
- De la diferencia entre las ZOF y ZOA se identificó el polígono nombrado como zonas óptimas nuevas (ZON). Estas áreas provienen de un inminente cambio de categoría favorable, ya sea de condiciones medias o bajas.
- De la intersección entre las ZON y las zonas medias actuales (ZMA) se consiguió el polígono con las zonas de transición positiva tipo II (ZTP II) que contiene las áreas actuales medias que transitaron a óptimas en el futuro.
- De la diferencia entre las ZON y las ZTP II se obtuvieron las zonas de transición positiva tipo I (ZTP I), cuyas áreas en el escenario actual tienen condiciones bajas, pero bajo el escenario de cambio climático pasan a óptimas.
- De la diferencia entre ZOA y ZOF se consiguió el polígono denominado como zonas óptimas perdidas (ZOP). Estas áreas derivan de una transición desfavorable, puesto que contienen cambios de óptimos a medios o incluso bajos.
- De la intersección entre las ZOP y las zonas medias a futuro (ZMF) se identificó el polígono con las zonas de transición negativa tipo I (ZTN I), donde las áreas con condiciones óptimas transitaron a una categoría media.
- De la diferencia entre las ZOP y las ZTN I se reconocieron las zonas de transición negativa tipo III (ZTN III). En estas áreas sucederían

los cambios más perjudiciales puesto que provienen de condiciones óptimas que a futuro serían bajas.

- De la intersección entre las ZMA y ZMF se obtuvieron las zonas medias persistentes (ZMP), es decir, las áreas medias actuales que perseverarían a futuro.
- De la diferencia entre las ZMF y las ZMA se consiguieron las zonas medias nuevas (ZMN), es decir, áreas con potencial medio a futuro que, o bien provienen de una categoría menor (baja) o viceversa.
- De la diferencia entre las ZMN y las ZTN I se identificaron las zonas de transición positiva tipo III (ZTP III), cuyas áreas provienen de condiciones bajas en el escenario actual pero a futuro pasarían a ser medias.
- Por último, de la diferencia entre las ZMA, las ZMF y las ZTP II se reconocieron las zonas de transición negativa tipo II (ZTN II), donde las áreas actuales contienen condiciones medias pero a futuro pasarían a ser bajas.

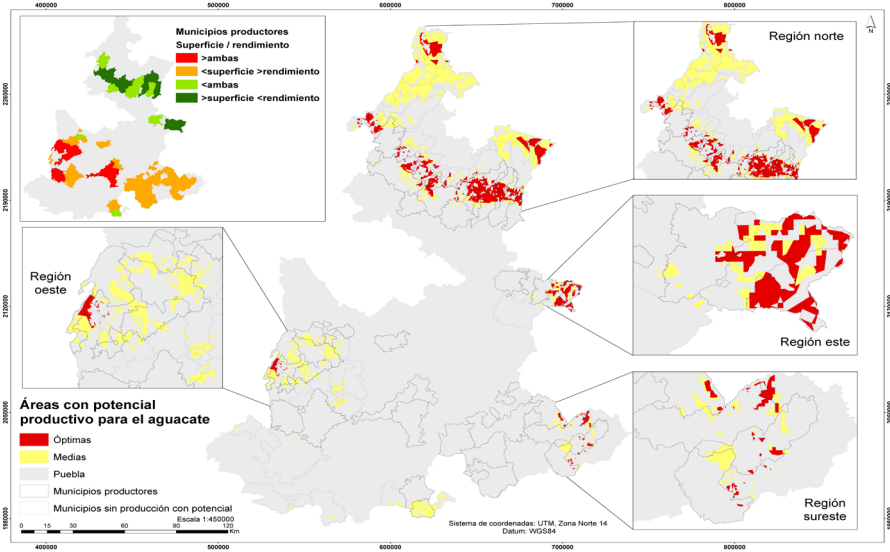
### **Distribución espacial de las áreas óptimas para el establecimiento de plantaciones. Replanteamientos y nuevas oportunidades**

El área total de la superficie óptima para el aguacate en Puebla se aproxima a las 85 300 ha, distribuidas en cuatro regiones (figura 14.4): la principal al norte del estado con una dirección noroeste-este en la Sierra Madre Oriental, abarca las subprovincias fisiográficas Lagos y Volcanes del Anáhuac, Carso Huasteco y Chiconquiaco donde se tienen principalmente climas bajo la clasificación de Köppen modificada por García (2001) del tipo C(m)(f), C(f), (A)C(fm), A(f) y Am(f); la segunda al este, insertada en la subprovincia Lagos y Volcanes del Anáhuac con climas (A)C(fm), C(f), C(m)(f); la tercera región se localiza al sureste en la subprovincia de las Sierras Orientales donde los climas son (A)C(m), C(m) y C(w2); y la cuarta región es la del oeste en los Lagos y Volcanes del Anáhuac donde los climas son (A)C(w1) y C(w2).

En estas mismas regiones también se encuentran zonas con condicio-

nes por debajo de las óptimas que se han evaluado aquí como medias (valores entre 0.6 y 0.79), con una superficie total de, aproximadamente, 214 000 hectáreas distribuidas, en su mayoría, al norte y oeste de Puebla.

Figura 14.4. Áreas con potencial productivo para el aguacate en Puebla



Fuente: Elaboración propia.

Del total de superficie óptima, 50 000 ha se distribuyen en municipios que producen aguacate, siendo los de la región norte y este las de mayor proporción, y el caso más extremo sucede al centro de la entidad. Las más de 35 000 ha con condiciones óptimas restantes se encuentran en municipios que no tienen registro de superficie sembrada con aguacate. En cuanto a las zonas con potencial productivo medio, 25 % de ellas se localizan en municipios que en la actualidad producen aguacate, principalmente al oeste y norte de la entidad. Una situación que resaltar es la discrepancia entre las áreas con las condiciones óptimas para las plantaciones y la relación entre la superficie sembrada y el rendimiento, según los datos promedio del 2003 al 2020 del SIAP (2021). En la figura 14.4 existe una clara diferencia; al norte y este, con valores por debajo del promedio o bien con mayor superficie, pero bajos rendimientos; y al oeste, centro, sur y sureste de la entidad con

valores por encima del promedio o baja superficie sembrada, pero altos rendimientos, tal y como se ha constatado en el apartado de panorama agrícola en Puebla.

Por un lado, municipios con valores por encima de la media en superficie/rendimiento localizados al sureste, centro y oeste de Puebla bajo el modelo de zonificación que presentan pocas áreas con condiciones óptimas y medias (las regiones del sureste y oeste). El resto de los municipios con valores por encima de la media en ambas variables o bien con datos de rendimientos altos, no tienen polígonos ni condiciones óptimas ni medias; en concreto se trata de la región centro y oeste. Lo anterior da pauta para inferir que los altos rendimientos que muestran los datos obtenidos se asociarían con el uso de insumos externos (sistemas de riego, fertilizantes, plaguicidas, etcétera), ya que municipios como Tochimilco, Tepexi, Zacapala, Atlixco, y principalmente Izúcar de Matamoros cuentan valores de producción altos, lo cual estaría relacionado con la capacidad de adquisición de dichos insumos.

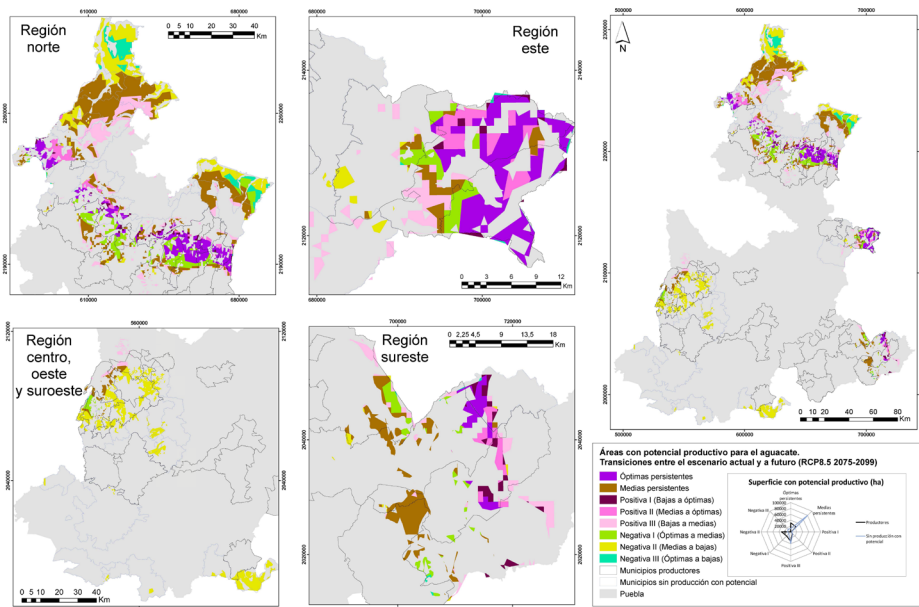
Por otra parte, el planteamiento lógico obedecería a que las áreas que contienen la mayoría de los polígonos que representan las zonas con condiciones óptimas para el aguacate coincidan con los datos favorables de superficie/rendimiento, sin embargo, los resultados señalan lo contrario. En este sentido, es probable que factores que intervienen en el rendimiento de los árboles y que no fueron considerados en el modelo, tales como la edad de las plantaciones, incidencia de plagas y enfermedades o el manejo del cultivo en general estén relacionados con los datos reportados por el SIAP como sucede principalmente al norte. En ambos casos es difícil comprobar las suposiciones planteadas debido a la ausencia de datos oficiales.

Otro aspecto para considerar son las áreas que cuentan con condiciones óptimas o medias y que no están asociadas con los datos de producción; en este sentido, dichas áreas podrían ser tomadas en cuenta como áreas potenciales para el establecimiento de nuevas plantaciones. A pesar de que existen zonas al oeste y sureste con condiciones potenciales por debajo de las óptimas, es en los municipios más septentrionales de la región norte con climas más cálidos donde se distribuyen más áreas con potencial productivo.

## Perspectivas a futuro. Cambios en los patrones de distribución de las áreas con potencial productivo

De inicio se puede reconocer en la figura 14.5 que habría mayores áreas con condiciones medias; si se conjugan con las áreas medias actuales podría significar que esta sería la categoría de potencial productivo dominante en un horizonte a largo plazo en Puebla. La superficie sembrada es menor que las áreas con potencial óptimo y medio actuales y a futuro (figura 14.6). Las regiones norte, este y sureste, que bajo el escenario actual tienen superficies potenciales óptimas y medias relevantes, bajo un horizonte lejano también contarían con áreas dentro de estas categorías, mientras que en la región oeste las superficies óptimas disminuirían y en la región centro prácticamente no parece que se distribuyan áreas con potencial óptimo y medio.

Figura 14.5. Áreas con potencial productivo para el aguacate en Puebla y sus transiciones bajo el modelo ensamble MPI-ESM-LR. RCP85. Horizonte 2075-2099



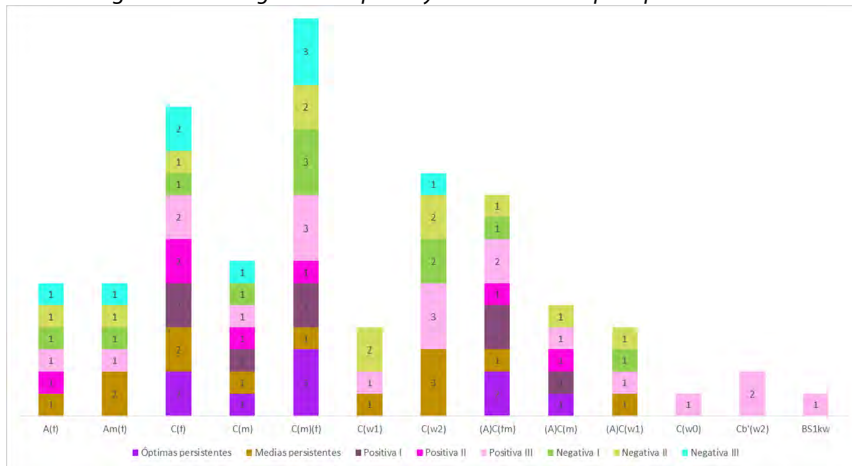
Fuente: Elaboración propia.



Por su parte, las transiciones positivas tipo II ocurrirían en el clima cálido húmedo A(f) al norte de la entidad, en los tres climas templados húmedos y en los dos semicálidos húmedos del grupo de los templados. Las transiciones positivas del tipo III sucederían en prácticamente todos los grupos climáticos que tienen potencial para el aguacate, incluso en climas donde no existe potencial actual como el templado subhúmedo C(w0), semifrío subhúmedo Cb<sup>3</sup>(w2) asociado a altitudes mayores cercanas a la región de los volcanes en el oeste y al Citlaltépetl al oeste y un semiárido templado con lluvias de verano BS1kw.

En cuanto a las transiciones negativas tipo I, la más relevante sucedería en el clima C(m)(f) y en el resto de los grupos climáticos estaría presente con excepción del C(w1) y (A)C(m). Las transiciones negativas tipo II tendrían lugar en la mayoría de los grupos climáticos con potencial, con excepción del clima C(m) localizado en la región sureste. Por último, en los climas cálidos húmedos, templados húmedos y templado subhúmedo sucederían las transiciones negativas tipo III (figura 14.7).

Figura 14.7. Categorías de aptitud y sus transiciones por tipos de climas



Fuente: Elaboración propia.

Las mayores transiciones sucederían en la región norte de Puebla. Las áreas correspondientes a la franja óptima de dirección noroeste-este permanecerían; aquellas zonas que se distribuyen al norte de las áreas persis-

tentes cambiarían a condiciones favorables (de medias a óptimas); mientras que al sur de dichas zonas persistentes el patrón es distinto puesto que las áreas con condiciones óptimas transitarían a condiciones medias que, en conjunción con las áreas medias persistentes y las que cambiaron de condiciones bajas a medias, formarían una franja de aptitud media. Por otro lado, en la parte más septentrional y noreste de la región norte los cambios también serían relevantes: se conservarían las áreas con condiciones medias e incluso algunas áreas bajas transitarían a condiciones medias, sin embargo, los cambios desfavorables de condiciones óptimas a bajas y medias a bajas serían evidentes. En este caso, los municipios sin producción con potencial actual serían los menos favorecidos con esos cambios.

Para la región este no solo permanecerían las áreas actuales óptimas y medias, sino que las transiciones de medias a óptimas y bajas a medias permitirían la conexión entre los polígonos de aptitud, formando regiones potenciales reconocibles para el aguacate. Una situación parecida a lo que ocurriría en la región este se encontraría en la región sureste con presencia de corredores de aptitud, pero también áreas aisladas con diversas condiciones de potencial productivo. En las regiones centro, sur, suroeste y oeste el escenario a futuro luce menos favorable que en el resto. Por un lado, los municipios que actualmente producen aguacate localizados en el centro, bajo el escenario planteado, no tendrían áreas donde sucediera una transición positiva; en la región sur, las áreas con condiciones medias cambiarían a bajas, al igual que en el suroeste. Mientras que, en la región oeste, las condiciones a futuro pasarían a ser medias puesto que las zonas óptimas actuales transitarían a una condición menor, aunado a las áreas medias que se mantendrían y aquellas que podrían aparecer gracias a la conversión de áreas bajas a medias, formándose una franja de aptitud asociada al clima C(w2). Sin embargo, la mayor parte de las áreas medias actuales distribuidas en esta región se convertirían en condiciones bajas para el aguacate. En los municipios que actualmente producen aguacate, la mayoría de los polígonos que contienen son aquellos donde las condiciones pasan de bajas a medias, seguido del cambio de medias a bajas y las áreas óptimas persistentes. En contraste, en los municipios que no producen aguacate, pero con condiciones potenciales actuales, serían los polígonos con las condiciones medias persistentes y la conversión de bajas a medias las que predominarían.

## Discusión

Se debe tener presente que en este trabajo se habla de condiciones promedio y a una escala regional. Se trata entonces de un análisis prospectivo para esta entidad que identifica las áreas óptimas para el aguacate examinando las mejores condiciones climáticas y edáficas disponibles para que la inversión en insumos sea mínima. Como se ha mencionado, la precipitación y temperatura son los elementos más relevantes para el aguacate. Una situación similar la obtuvo Campos-Campos (2012) para su zonificación: de 37 variables ambientales diez de ellas tuvieron el mayor peso, de las cuales la temperatura, suelo y precipitación explicaron más de 90 % de la variación agroecológica. En contraste, Selim et al. (2018) obtuvieron que la profundidad y la permeabilidad del suelo fueron los factores relevantes en la localización de áreas adecuadas para el aguacate, mientras que la única limitante climática considerada en su estudio fueron las temperaturas mínimas. No obstante, incluso los autores advierten que son los factores climáticos los más importantes porque estos no pueden ser modificados por los humanos. En este tenor, las repercusiones en el aguacate por alteraciones en la temperatura y precipitación, así como la modificación de las zonas productoras continúan en estudio (Tapia-Vargas et al., 2011; Álvarez-Bravo et al., 2017).

Por otra parte, la zonificación muestra que la aptitud para el aguacate se asocia con los climas templados y cálidos. Se hace notar que la mejor aptitud se encuentra en la región norte, sin embargo, es ahí donde se presentó la mayor sobreposición con lo que se denominó aquí como usos de suelo prioritario (véase la tabla 14.3) donde se restringe el cultivo. El hecho de que las necesidades ambientales requeridas por el aguacate se encuentren en los bosques templados supone un problema de uso del suelo, particularmente por la conversión de forestal a plantaciones de aguacate, tal y como lo han documentado en otras entidades (Bravo-Espinoza et al., 2009; Garibay-Orozco y Bocco-Verdinelli, 2011; Segundo-Vivanco, 2018; Ayala-Montero et al., 2021).

En el caso de Puebla, los municipios que tienen en su territorio áreas óptimas para las plantaciones y que producen aguacate actualmente como

Teziutlán, Cuautempan, Quimixtlán y Chichiquila han perdido entre 39 y 177 ha de cobertura forestal de 2001 al 2019 de acuerdo con las cifras del Global Forest Watch (2020), situación que se puede agravar si se realizan aperturas sin planificación previa.

Los resultados apuntan a que hay zonas con condiciones óptimas y medias que actualmente pueden ser aprovechadas para nuevas plantaciones; sin embargo, se tendrá que valorar la posible conversión de cultivos evitando el cambio a grandes extensiones de monocultivos o paisajes dominados por huertas de aguacate y de grandes productores; lo que puede ser más viable es limitar la superficie destinada para las plantaciones; se conoce que a mayor superficie sembrada más dependencia a paquetes tecnológicos para incrementar los rendimientos (Morales-Carrillo y Gamboa-Zatarain, 2010). En este tenor, Montiel-Aguirre et al. (2008) indican que se requiere al menos 6.72 ha para la rentabilidad del aguacate y minimizar los costos unitarios para competir en el mercado nacional y el de exportación. Con relación a lo anterior, se deberá tener en cuenta que no toda la producción tiene que estar orientada a la exportación, pues el mercado nacional, la economía regional, local e incluso el autoconsumo tienen un rol importante.

En cuanto a las áreas de aptitud bajo el escenario de cambio climático, es importante tener en cuenta que los resultados deben considerarse como aproximaciones a un escenario futuro. Los modelos del clima tienen diversas limitaciones para simular aspectos del mismo (Ortiz-Paniagua y Ortega-Gómez, 2015), por lo que su proyección a horizontes futuros lejanos conlleva un grado de incertidumbre mayor. No obstante, son herramientas útiles para la prospección orientada hacia el aprovechamiento de recursos y riesgos y en la formulación de estrategias de adaptación. En este sentido, en investigaciones como las de Álvarez et al. (2017) o Charre et al. (2019), donde se alude que los cambios en la temperatura y precipitación repercutirían en la distribución espacial del aguacate bajo escenarios de cambio climático para México, proporcionan información sobre los impactos indirectos del cambio climático.

Con base en lo anterior, en Puebla las áreas óptimas se restringirían al norte, este y sureste, y en regiones como la centro y oeste esas superficies con mejores condiciones para el aguacate se reducirían. Al respecto, se podría plantear si compensa el costo de la producción y los beneficios econó-

nicos que se obtendrían a futuro. En este aspecto, la producción de aguacate bajo condiciones medias se lleva a cabo actualmente, de hecho, los datos oficiales del SIAP indican que los municipios con mayores producciones y rendimientos se localizan al centro y oeste de Puebla, sin embargo, es probable que el costo económico se incremente. Franco-Sánchez et al., (2018) indican que tan solo el gasto en alquiler de la tierra puede alcanzar los 30 000 pesos mexicanos, el uso de tractor entre 5 000 y 8 000 pesos, el gasto en contratación de personal los primeros 3 años de la plantación es alrededor de los 10 000 pesos y, sobre todo, el uso de insumos químicos (como mínimo 30 000 pesos) ya representan un costo importante para la producción.

Por lo anterior, además del enfoque agroclimático que se ha presentado en esta investigación, se puede incentivar como rutas alternativas de producción mediante sistemas agroforestales o sostenibles (Montiel-Aguirre et al., 2008). Con la asociación de cultivos como en los sistemas agroforestales se mejora la fertilidad del suelo, se protege de la erosión, se favorece el control de plagas de manera natural y además se reduce la dependencia económica de un solo cultivo (Nataren-Velazquez et al., 2020). Todo ello con el propósito de lograr el aprovechamiento mesurado de los recursos para mitigar los impactos negativos con el mínimo de insumos externos que represente un coste económico menor y que a la vez se contribuya con la demanda de este frutal.

## Conclusiones

La superficie sembrada es menor que las áreas con potencial óptimo y medio actuales y a futuro, principalmente al norte, este, sureste y oeste. En el estado de Puebla se encuentran áreas con condiciones climáticas y de suelos suficientes para incentivar y fortalecer la producción del aguacate.

En cuanto a la metodología utilizada puede robustecer a las que se han desarrollado para la zonificación de cultivos en vía de la planificación agrícola, además, puede ser comparada, complementada o fortalecida con la incorporación de otras variables o con métodos de ponderación diferentes. Con el fin de fortalecer la toma de decisiones para la planificación agrícola

en este territorio y para futuras investigaciones, recomendamos la creación de una base de datos georreferenciada para las plantaciones de aguacate en Puebla que permita el contraste de los modelos que se generen.

## Referencias

- Alcantar-Rocillo, J. J., y Muñoz-Flores, H. J. (2012). Factores limitantes climáticos y altitudinales. En G. T. V. Chávez-León, *Impacto del uso de suelo forestal a huertos de aguacate* (pp. 75-80). INIFAP.
- Alcantar-Rocillo, J. J. (2009). Requerimientos agroecológicos. En V. M. Coria-Avalos (Ed.), *Tecnología para la producción de aguacate en México* (pp. 17-27). SAGARPA/INIFAP.
- Álvarez-Bravo, A., Salazar-García, S., Ruíz-Corral, J. A., y Medina-García, G. (2017). Escenarios de cómo el cambio climático modificará las zonas productoras de aguacate Hass en Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(19), 4035-4048. <http://doi.org/10.29312/remexca.v0i19.671>
- Arias, F., Montoya, C., y Velázquez, O. (2018). Dinámica del mercado mundial de aguacate. *Revista Virtual Universidad Católica del Norte*, (55), 22-35.
- Ayala-Montejo, D., Valdés-Velarde, E., y Romo-Lozano, J. L. (2021). Análisis y priorización de sistemas de producción asociadas al café y aguacate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(3), 525-539.
- Bravo-Espinoza, M., Sánchez-Pérez, J., Vidales-Fernández, J. A., Sáenz-Reyes, J. T., Chávez-León, J. G., Madrigal-Huendo, S., Muñoz-Flores, H., Tapia-Vargas, L. M., Orozco-Gutiérrez, G., Alcántar-Rocillo, J., Vidales-Fernández, I., y Venegas-González, E. (2009). *Impactos ambientales y socioeconómicos del cambio de uso del suelo forestal a huertos de aguacate en Michoacán*. INIFAP.
- Campos-Campos, O. (2012). *Zonificación agroecológica del aguacate (Persea americana Mill. var. Hass.) en la cuenca del Río Duero* [Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional]. <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/12258>
- Charre-Medellín, J. F., Mas, J. F., y Chang-Martínez, L. A. (2019). Áreas potenciales actuales y futuras de los cultivos de aguacate Hass en México utilizando el modelo Maxent en escenarios de cambio climático. *Revista UD y la Geomática*, (14), 26-33.
- Chivasa, W., Mutanga, O. y Biradar, C. (2019). Mapping land suitability for maize (*Zea mays* L.) production using GIS and AHP technique in Zimbabwe. *South African Journal of Geomatics*, 8(2), 265-281.
- Coria-Avalos, V. M. (2009). *Tecnología para la producción de aguacate en México*. SAGARPA/INIFAP.
- Fernández-Eguiarte, A., Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno, R., Conde-Álvarez, A. C., y Trejo-Vázquez, R. I. (2015). *Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica*. UNAM/INECC.

- Franco-Sánchez, M. A., Leos-Rodríguez, J. A., Salas-González, J. M., Acosta-Ramos, M., y García-Munguía, A. (2018). Análisis de costos y competitividad en la producción de aguacate en Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(2), 391-403.
- Gandolfo, S. P. (2008). *Factores ecofisiológicos relacionados con el crecimiento vegetativo, floración y desarrollo del fruto de aguacate* [Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Valencia]. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/3441/tesisUPV2868.pdf>
- García, E. (2001). *Climas*. CONABIO. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/clima1mgw.html>
- García-Lozano, J., Ríos-Gallego, G., Franco, G., Sandoval-Arana, A. P., y Vásquez-Gallo, L. A. (2013). *Atlas: Zonificación de las tierras para el uso potencial del cultivo de aguacate c.v. Hass en Colombia*. CORPOICA.
- Gardiazabal, F. (29 de septiembre a 1 de octubre de 2004). *Factores agronómicos a considerar en la implantación de un huerto de paltos*. 2° Seminario internacional de paltos. Sociedad Gardiazabal y Magdahl Ltda. Quillota, Chile.
- Garibay-Orozco, C., y Bocco-Verdinelli, G. (2011). *Cambios de uso del suelo en la meseta purépecha (1976-2005)*. INECC / SEMARNAT.
- Garrido-Ramírez, E. R., Noriega-Cantú D. H., Gutiérrez-Del Valle, A., González-Mateos, R., Pereyda-Hernández, J., Domínguez-Márquez, V. M., López-Estrada, M. E., Alarcón-Cruz, N., Valentín-Benigno, A., y Leyva-Mayo, A. (2013). Áreas potenciales para el cultivo de Aguacate (*Persea americana* L.) cultivas "Hass" en el Estado de Guerrero, México. *Agroproductividad*, 6(5), 52-57.
- Global Forest Watch (27 de noviembre de 2020). *Tree cover lost in Puebla*. [www.globallforestwatch.org](http://www.globallforestwatch.org)
- González-Hernández, A., Romero-Sánchez, M. E., Pérez-Miranda, R., Zamora-Martínez, M. C., Islas-Trejo, B., y López-Espinosa, A. G. (2017). *Potencial productivo para el establecimiento de Hevea brasiliensis (Willd. ex. A. Juss.) Müll. Arg. en el trópico húmedo mexicano*. INIFAP / CENID / COMEF.
- Gutiérrez-Contreras, M., Lara-Chávez, Ma. B. N., Guillén-Andrade, H., y Chávez-Bárceñas, A. T. (2010). Agroecología de la franja aguacatera en Michoacán, México. *Inter ciencia*, 35(9), 647-653.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2004). *Guía para la Interpretación de Cartografía. Edafología*. INEGI.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2005). *Conjunto de datos edafológicos. Escala 1:1 000 000 serie I*. INEGI. [www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267636](http://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267636)
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2013). *Conjunto de datos de Perfiles de suelos. Escala 1:250 000. Serie II (Continuo Nacional)*. INEGI. [www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825266707](http://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825266707)
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2014). *Conjunto de Datos de Erosión del Suelo, Escala 1: 250 000 Serie I (Continuo Nacional)*. INEGI. [www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825004223](http://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825004223)

- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2017a). *Anuario estadístico y geográfico Puebla 2017*. INEGI.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2017b). *Conjunto de datos vectoriales de la carta de Uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI*. INEGI. [www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463173359](http://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463173359)
- Jardón-Barbolla, L. O., Alavez-Gómez, V., Méndez, A., Gaona, A., Wegier, A. L., y Piñero, D. (2011). *Cuarto informe: Análisis para la determinación de los centros de origen, domesticación y diversidad genética del género Persea y la especie Persea americana (aguacate)*. UNAM /SEMARNAT /CONABIO.
- Lucero-Pulido, M., y Navarro-Ainza, J. A. (2013). *Requerimientos agroclimáticos del cultivo de aguacate*. SAGARPA / INIFAP. [http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/3934/CIRNO\\_010209142800048868.pdf?sequence=1](http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/3934/CIRNO_010209142800048868.pdf?sequence=1)
- Malczewski, J. (1999). *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. Wiley.
- Montiel-Aguirre, G., Krishnamurthy, L., Vázquez-Alarcón, A., y Uribe-Gómez, M. (2008). Opciones agroforestales para productores de aguacate. *Terra Latinoamericana*, 26(1), 85-90.
- Morales-Carrillo, N., y Gamboa-Zatarain, T. (2010). El aguacate como eje de una estrategia de desarrollo regional en Nayarit. *Revista de Geografía Agrícola*, (44), 41-55.
- Nataren-Velazquez, J., Angel-Pérez, A., Megchún-García, J. V., Ramirez-Herrera, E., y Meneses-Marquez, I. (2020). Caracterización productiva del aguacate (*Persea americana*) en la zona de alta montaña Veracruz, México. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 6(12), 1406-1423. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v6i12.9941>
- Ortiz-Paniagua, C. F., y Ortega-Gómez, A. M. (17 al 20 de noviembre de 2015). *Agricultura y cambio climático en la región aguacatera del estado de Michoacán*. 20° Encuentro Nacional sobre Desarrollo Regional en México. Cuernavaca, Morelos. México. AMECIDER / CRIM / UNAM.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2020). *Las principales frutas tropicales. Análisis del mercado 2018*. FAO. [www.fao.org/publications/card/es/c/CA5692ES/](http://www.fao.org/publications/card/es/c/CA5692ES/)
- Pacheco, J. F., y Contreras, E. (2008). *Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos*. ONU / CEPAL.
- Romero-Sánchez, M. A. (2012). *Comportamiento fisiológico del aguacate (Persea americana mill.) Variedad Lorena en la zona de Mariquita, Tolima* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9437>
- Ruiz-Corral, J. A., Medina-García, G., González-Acuña, I. J., Flores-López, H. E., Ramírez-Ojeda, G., Ortiz-Trejo, C., Byerly M., K. F., y Martínez-Parra, R. A. (2013). *Requerimientos Agroecológicos de Cultivos*. INIFAP. <http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/jspui/handle/123456789/4515>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2017). *Planeación agrícola nacional 2017-2030. Aguacate mexicano*. Sagarpa. [www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257067/Potencial-Aguacate.pdf](http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257067/Potencial-Aguacate.pdf)
- Sarmiento-Sarmiento, D. (21 al 23 de noviembre de 2018). *El cultivo del aguacate en el sur*

- peninsular*. Jornadas Técnicas sobre Aguacate, San Cristobal de la Laguna, Canarias. [www.icia.es/icia/index.php?option=com\\_content&view=article&id=4577&Itemid=100284](http://www.icia.es/icia/index.php?option=com_content&view=article&id=4577&Itemid=100284)
- Segundo-Vivanco, A. (2018). *Análisis del proceso de expansión de la superficie cultivada con aguacate y su impacto en los recursos naturales del municipio de Tacámbaro, Michoacán, 1990-2016* [Tesis de maestría, El Colegio de la Frontera Norte-CICESE]. <https://www.colef.mx/posgrado/tesis/20161310/>
- Selim, S., Koc-San, D., Selim, C., y San, B. T. (2018). Site selection for avocado cultivation using GIS and multi-criteria decision analyses: Case study of Antalya, Turkey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 450-459. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.09.038>.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales / Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (2017). *Áreas Naturales Protegidas Federales de México*. Semarnat / Conanp.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2018). *Atlas agroalimentario 2012-2018*. SIAP. <https://www.gob.mx/agricultura%7Cdgsiap/es/articulos/atlas-agroalimentario-2012-2018-la-transformacion-productiva-del-campo-mexicano>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2021). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. SIAP. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Sotelo-Ruíz, E. D., Cruz-Bello, G. M., González-Hernández, A., y Moreno-Sánchez, F. (2016). Determinación de la aptitud del terreno para maíz mediante análisis espacial multicriterio en el Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(2), 401-412.
- Tapia-Vargas, L. M., Larios-Guzmán, A., Vidales-Fernández, I., Pedraza-Santos, M. E., y Barradas, V. L. (2011). Cambio climático en la zona aguacatera de Michoacán: análisis de la precipitación y temperatura a largo plazo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (21), 325-335.
- Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (2014a). *Climatología de referencia a partir de la base WorldClim Global Climadate para el periodo 1950-2000. Precipitación (mm). Resolución espacial 30" x 30"*. Unitamos. <http://ri.atmosfera.unam.mx:8550/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/30374f42-0981-47b7-b6cd-314bef1ce7fb>
- Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (2014b). *Climatología de referencia a partir de la base WorldClim Global Climadate para el periodo 1950-2000. Temperatura máxima (°C). Resolución espacial 30" x 30"*. Unitamos. <http://ri.atmosfera.unam.mx:8550/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/11d755e4-a11c-41d1-b1d8-2616d4e434e9>
- Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (2014c). *Climatología de referencia a partir de la base WorldClim Global Climadate para el periodo 1950-2000. Temperatura mínima (°C). Resolución espacial 30" x 30"*. Unitamos. <http://ri.atmosfera.unam.mx:8550/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/0e543362-ebb8-41ea-9573-76b4e768ecaf>
- Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (2014d). *Modelo*

- MPI-ESM-LR. RCP85. Horizonte 2075-2099. Precipitación (mm). Resolución espacial de 30" x 30".* Unitamos. <https://ri.atmosfera.unam.mx/aecc/srv/eng/catalog/search#/metadata/15326ebc-de11-478c-b7ef-847ee88435fa>
- Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (2014e). *Modelo MPI-ESM-LR. RCP85. Horizonte 2075-2099. Temperatura máxima (°C). Resolución 30" x 30".* Unitamos. <https://ri.atmosfera.unam.mx/aecc/srv/eng/catalog/search#/metadata/6baf7494-a311-46eb-8bb7-aa2a9bed9b80>
- Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (2014f). *Modelo MPI-ESM-LR. RCP85. Horizonte 20175-2099. Temperatura mínima (°C). Resolución espacial de 30" x 30".* Unitamos. <https://ri.atmosfera.unam.mx/aecc/srv/eng/catalog.search#/metadata/285aa20b-eeae-4b1e-873f-4fa27af5c6f0>
- Zapata-Guzmán, J. E., Tobón-Acevedo, J. D., Patiño-Tiria, H. I., Palacios, E. H., Mejía-Córdoba, C. A., Marín-Zapata, H. D., Alcaraz-Machado, C., y Alcaraz-Guzmán, E. (2018). *El cultivo de aguacate Persea americana en el occidente de Antioquia*. Servicio Nacional de Aprendizaje/Centro Tecnológico, Turístico y Agroindustrial del Occidente Antioqueño.